

## 九谱段焦面配准测试仪的研制

常君磊, 李庆林, 张楠, 李富强, 于生全, 魏志勇, 王媛媛, 杨沐

(北京空间机电研究所 成像技术研究室, 北京 100190)

**摘要:** 多通道焦面遥感相机通道间的配准是相机总装定焦过程中的关键技术, 通道间的配准精度决定了后续通道融合后的遥感图像质量。设计并完成了一套用于解决九谱段双通道焦面配准的测试仪。积分球照明一条狭缝, 经平行光管成像在无穷远, 照明九谱段相机, 在相机焦面上得到一个竖直放大的狭缝像。四谱段、五谱段线阵探测器分别位于双通道焦平面上, 分别调整双通道焦面的位置, 计算四谱段、五谱段探测器上狭缝像的质心位置, 通过质心位置来评价通道间像元的对准精度。该仪器解决了多通道焦面遥感相机通道间的配准问题, 配准精度达亚像素量级, 保证了通道融合后的图像质量。

**关键词:** 遥感相机; 多通道焦面; 配准精度; 多谱带

中图分类号: TN29; V443.5 文献标志码: A DOI: 10.3378/IRLA202049.0314001

## Development of focal plane registration instrument for a nine-spectral camera

Chang Junlei, Li Qinglin, Zhang Nan, Li Fuqiang, Yu Shengquan, Wei Zhiyong, Wang Yuanyuan, Yang Mu

(Imaging Technology Research Department, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Multi-channel focal plane registration of remote-sensing camera is the key step in camera assembling process. Registration accuracy determines quality of the image after channel fusion. The development of focal plane registration instrument for a nine-spectral double-channel camera was proposed in this article. A slit was illuminated by integrating sphere and imaged at infinity with collimator. The infinity slit was recorded by the nine-spectral camera, and became an enlarged vertical slit on camera focal plane. The four-spectral detector and five-spectral detector were on two different focal plane channels. By approaching the slit image centroid position on two different detectors, the two focal plane channel were aligned together in high precision. This instrument solved the problem of high registration accuracy of multi-channel camera. Sub-pixel registration accuracy could be reached by the instrument, assuring the camera image composite.

**Key words:** remote sensing camera; multi-channel focal plane; registration accuracy; multispectral

## 0 引言

多谱带成像是资源勘查类遥感相机的主要特征,采用多谱带探测器是实现多类景物成像的主要方式。但当目标景物种类超过单个探测器谱带数量时,就需要增加探测器种类以实现更多谱带的成像需求,即所谓的多通道成像<sup>[1-2]</sup>。目前,多通道遥感相机主要通过视场分光的形式来解决多通道成像。为获得高品质的多谱带融合图像,不同通道探测器间各谱带像元位置要在光学空间上一一对准,即在像方焦平面处沿线阵方向上像元空间位置差异为亚像元( $\mu\text{m}$ )量级,这样才能保证通道间图像融合后的成像质量。遥感相机不同成像通道间各谱带像元在像方焦面处沿线阵方向亚像元级的对准过程,即所谓的多谱带光学配准<sup>[3-5]</sup>。分光后不同通道的探测器分属不同结构组件,在不同结构组件间实现探测器亚像元级别的配准精度是非常困难的<sup>[6-10]</sup>。因此,多通道间谱带配准是光学遥感相机的一项关键技术,必须在总装定焦过程中予以保证。目前单通道内多个探测器间的拼接配准已比较成熟,但多通道间的配准仍处于研究摸索阶段<sup>[11-14]</sup>。“CBERS-1”遥感相机采用了成像放大法进行配准。将某谱带 CCD 放置于无穷远成像系统的焦面处,经聚焦透镜放大成像,由摄像系统接收,人眼通过视频图像观测到像元的位置信息。调整 CCD 将其中心像元置于光轴上,并固定。然后其余各谱段均以此谱带 CCD 为基准,通过转台转动,依次进行调整,从而完成全视场配准<sup>[15]</sup>。成像放大法需人眼观察判断及转台调整,受人眼差异、光强、转台精度等因素影响大,精度低,稳定性差。

文中要进行配准的遥感相机具有九个成像谱段,焦面为分光棱镜分光而成的两个成像通道,两通道分别采用五色(含一个全色谱段和四个多光谱段,二者像元大小不同)、四色 CCD(含四个多光谱段),分别实现五个光谱段成像和四个光谱段成像。一片 CCD 内各单谱段的对准精度由芯片光刻工艺决定,能满足图像融合要求,但是两成像通道之间则必须进行配准,才能满足后续的通道间图像融合要求。根据项目需求,两个通道间沿线阵方向的对齐精度需小于 0.3 像元,以满足后续的图像融合需求。目前,常用的成像放大法无法满足该相机中两通道九谱段的配准需求,

市场上也没有用于该类用途的商用测试仪器。为满足配准需求,研制了一种九谱段焦面配准测试仪,使用平行光管对狭缝成无限远像,狭缝模拟目标同时照明双通道上的九谱段探测器,分别在四色五色 CCD 上成放大的狭缝像,通过灰度重心法提取狭缝像质心位置<sup>[16]</sup>,依据质心位置调整焦面位置,实现通道间的高精度配准。传统的成像放大配准法,是依赖转台旋转分别对各谱段视场进行调整配准。相比传统方法,文中提出的方法是对各通道谱段同时照明成像,在同一子午视场下调整配准,不受环境及转台等外界因素的干扰。另外,传统的成像放大配准法是靠人眼观察视频像判读像元位置,属定性判读,精度低。文中提出的方法是基于数字图像处理的质心提取,属定量判读,结果更准确可靠。

## 1 检测原理

谱段焦面配准测试仪的检测原理如图 1 所示。积分球照明沿  $y$  方向放置的狭缝,经光学系统成像在无穷远,照明九谱段相机,在相机四色、五色焦平面上同时得到一个竖直放大的狭缝像。分别调整四色、五色焦面沿  $x$  轴的位置,计算四色、五色探测器上光斑的质心位置,通过对比质心位置,来评价通道间像元的对齐精度。

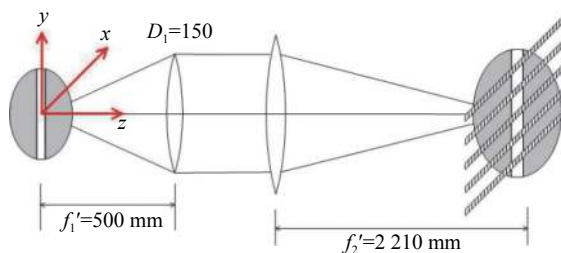


图 1 焦面配准测试仪原理图

Fig.1 Illustrative diagram of focal plane registration instrument

## 2 系统设计与分析

根据项目要求对测试仪系统参数进行针对性设计与分析。测试系统的主要技术指标为:谱段范围  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ , 焦距 500 mm, 入瞳口径 150 mm, 视场  $2\omega=4^\circ$ , 成像质量  $\text{RMS}=\lambda/7$  ( $\lambda=632.8\ \text{nm}$ )。照明光源采用积分球,主要技术指标为:内径 150 mm, 出口  $\Phi 50\ \text{mm}$ , 出口处均匀性  $\pm 2\%$ 。

采用 Zemax 对系统进行初步分析,一镜、两镜反射式系统视场不能满足要求,三反系统价格过高。透射式光学系统可满足使用要求,且成本合理,因此,选用了透射式光学系统进行实验验证。设计结果如图 2 所示,采用平行光管将靶标成像到无穷远的形式<sup>[17-18]</sup>。系统主要由前后两组镜头构成,口径  $\Phi$  150 mm,焦距 500 mm。前组包含一片单透镜与两片双胶合透镜,后组包含一片单透镜与一片双胶合透镜。系统中各视场、各波长的平均设计波像差为  $0.064\lambda(\lambda=0.6328 \mu\text{m})$ ,均约合  $\lambda/15$ 。下面对主要影响其检测精度和成像质量的因素进行分析。



图 2 设计光路图

Fig.2 Design optical path map

(a) 畸变与像差对质心位置的影响分析

主光线偏离理想像点产生的畸变与垂直于靶标线视场方向点扩散函数的非对称性都会造成配准误差。为精确地分析畸变、像差及靶标对中误差等因素对配准精度的影响,在 Zemax 中建立了如图 3 所示的模拟光学系统。系统出射平行光,照明焦距为 2 210 mm 的理想相机系统,在相机焦平面上采集点扩散函数,并将各视场点扩散函数错位叠加,仿真线光源成像。据此计算不同子午视场对应的光斑的弧矢位置,即配准误差,仿真结果如图 4 所示。

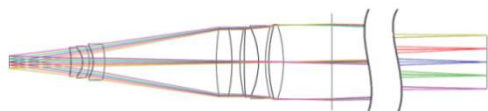


图 3 仿真计算系统光路图

Fig.3 System optical path diagram for simulation

靶标对准误差为  $100 \mu\text{m}$  时,  $\pm 2^\circ$  子午视场角范围内光斑质心在  $x$  方向的偏移量为  $-0.5 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ,显示为桶形畸变,对配准精度影响不大。

(b) 色差对质心位置的影响分析

测试仪采用同轴透射式光学系统,由于玻璃折射率影响,系统存在垂轴色差。图 5 为测试仪在  $2^\circ$  有效视场范围内 400、700、1 100 nm 谱段对应的垂轴色差。

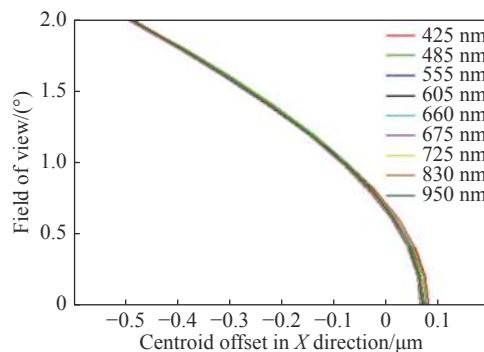


图 4 畸变与像差对质心位置的影响

Fig.4 Influences of distortion and aberration on centroid

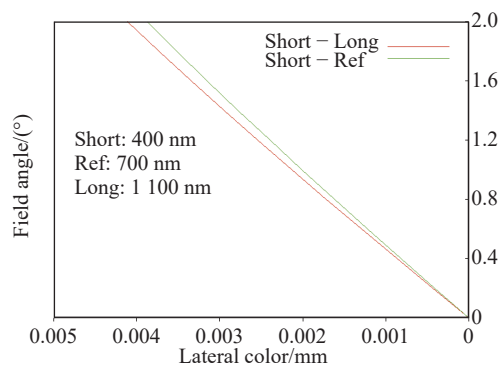


图 5 垂轴色差

Fig.5 Lateral chromatic aberration

如图 6 所示,当狭缝靶标穿过系统光轴,狭缝像质心没有偏移,垂轴色差对配准无影响。若狭缝偏离光轴  $D$ ,线视场  $H$  处垂轴色差会导致质心产生偏移,偏移量  $P=A \cdot D / H$ 。视场角为  $2^\circ$  时,  $H$  为 17.46 mm,长短波垂轴色差  $A$  为  $4 \mu\text{m}$ ,若狭缝偏移  $D$  为 0.5 mm,计算得  $P$  为  $0.11 \mu\text{m}$ 。实际测试仪狭缝靶标相对光轴的安装精度远优于 0.5 mm,因此,色差对配准精度无影响。

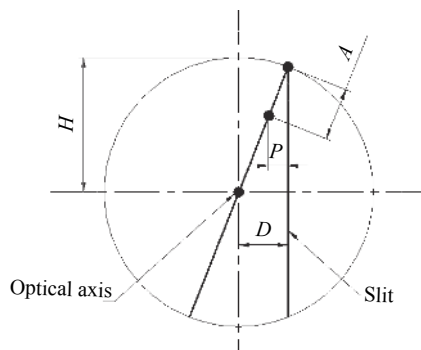


图 6 狭缝偏离光轴导致狭缝像质心的偏移

Fig.6 Slit image centroid shifting resulted from slit deviation

(c) 对温度影响的补偿

九谱段焦面配准测试系统要求在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  范围内工作。结构设计选择硬铝作为结构材料, 线胀系数  $23.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。温度的改变会引起结构的变化, 从而改变系统的焦距等参数, 造成像面光斑离焦及成像质量下降等问题。假定热胀冷缩过程中, 透镜与外筒位置相对固定, 则以前组透镜的最后一面顶点为坐标原点, 分析温度变化时的最佳焦面位置, 如表 1 所示。

表 1 温度变化对焦面位置的影响

Tab.1 Focal plane position with temperature

	Temperature		
	18 °C	20 °C	22 °C
Focal plane position	428.946	429.012	429.077

$\pm 2^\circ\text{C}$  的温度变化, 对应理想像面位置变化约为  $\pm 65 \mu\text{m}$ 。这里设计补偿杆来补偿焦面位置变化: 采用尼龙材料制作补偿杆, 其线胀系数为  $120 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。补偿杆起始于测试仪镜筒前端面, 后续串联到镜筒结构内, 补偿杆与镜筒选择合适的长度比例, 将像面位置变化减小到  $\pm 3 \mu\text{m}$  以内, 从而补偿温度引起的离焦, 确保光学系统参数满足要求。

### 3 成像质量测试

根据设计结果, 研制了一台九谱段焦面配准测试仪器样机。

#### 3.1 波像差测试结果

成像质量 (波像差) 是仪器技术指标中最核心的指标, 文中选用瑞士 FISBA 公司生产的 FST10 微小型激光球面干涉仪对该指标进行了测试。选用的镜头数值孔径  $NA=0.16$ , 工作波长  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 。测试光路原理图及照片如图 7 所示, 图 8 为测试现场图。干涉仪发出的标准球面波经待测平行光管系统后变为平面波, 再由标准平面反射镜准直进行测量。

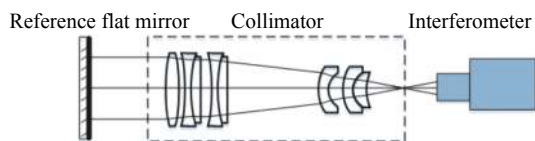


图 7 成像质量测试光路图

Fig.7 Optical path map for image quality test

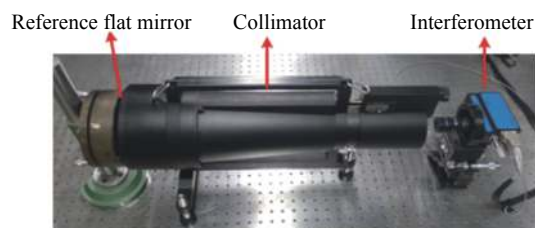


图 8 成像质量测试设备图

Fig.8 Photo of image quality test equipment

测试中, 平行光管焦面位置处放置如图 9 所示的多孔光阑。光阑上成十字形等间距排列, 横、数分别开有 11 个小孔, 孔间距 3.5 mm, 分别对应了不同的视场角。九谱段焦面配准精度测试设备的各视场波像差实测数据如图 10 所示, 各视场平均波像差为  $0.113\lambda$ , 约合  $\lambda/8.9$ , 成像质量优良。

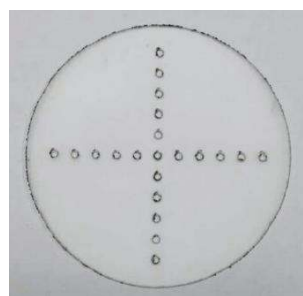


图 9 多视场波像差测试用多孔光阑

Fig.9 Multi-apertures for multi-field-of-view wave aberration test

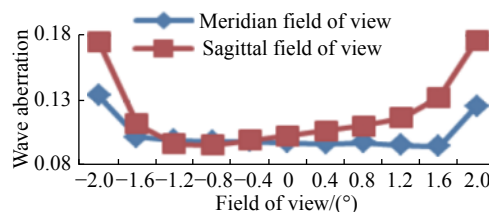


图 10 各视场波像差实测结果

Fig.10 Wave aberration test result of meridian and sagittal field of view

#### 3.2 像元配准结果

图 11 所示为实验中采集到的五色成像通道中一多光谱 CCD 线阵的光强分布。由于线阵像元数太多, 为显示清晰, 只截取了狭缝像中心附近约  $\pm 25$  像元区域的光强分布。狭缝像宽度 (半高全宽) 约占 8 像元。

五色成像通道由四个多光谱和一个全色线阵组成, 四色成像通道由四个多光谱线阵组成。八个多光谱线阵像元尺寸一致, 读取速度快, 同时通道内线阵

无需配准,故只需对齐两个通道间的八个多光谱线阵,即可实现通道间九谱段的配准。

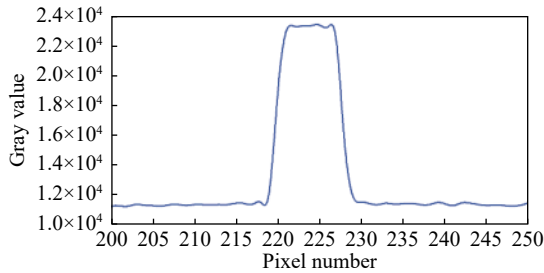


图 11 五色通道内一多光谱 CCD 线阵的光强分布

Fig.11 Response distribution of one multispectral CCD array in the five-color imaging channel

焦面配准前,八条多光谱线阵 CCD 采集到的狭缝像质心位置如图 12 所示。图中纵坐标为狭缝像的质心位置,单位为像元;横坐标为测量次数。为提高测量结果稳定性,实验中进行了 1 024 次重复测量,以 1 024 次质心测量的平均值作为测量结果。

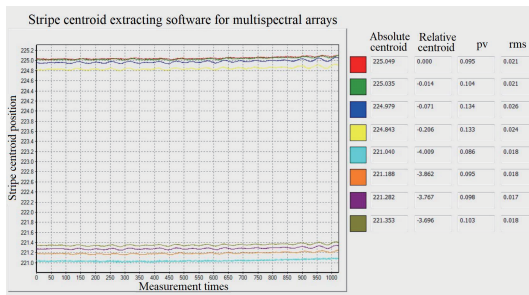


图 12 配准前八个多光谱通道的质心测量结果

Fig.12 Stripe centroid position of 8 multispectral arrays before registration

可以看出,八个多光谱通道的质心测量数据明显分为两簇。每片 CCD 上的四个多光谱通道采集到的狭缝像质心位置非常接近,两片之间相差约 4 像元。

焦面配准完成后,八条多光谱线阵 CCD 采集到的狭缝像质心位置如图 13 所示。8 个多光谱通道采集到的狭缝像质心分别为 225.301、225.274、225.236、225.106、225.111、225.216、225.264、225.303,其均值为 225.226 像元,方差为 0.006 像元,最大误差为 0.12 像元。

用研制的仪器对九谱段遥感相机进行配准的精度达到了 0.1 像元,满足 0.3 像元配准精度的使用要求。

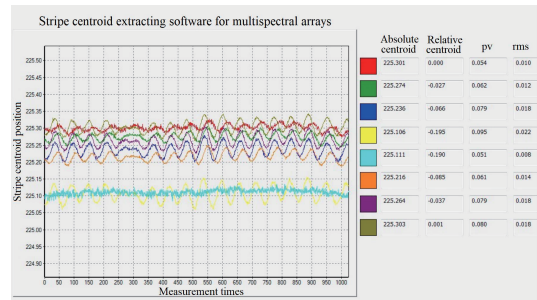


图 13 配准完成后八个多光谱通道的质心测量结果

Fig.13 Stripe centroid position of 8 multispectral arrays after registration

## 4 结 论

文中针对某九谱段遥感相机的双通道焦面配准需求,设计研制了一台配准测试仪。该仪器模拟无限远竖线靶标,在双通道探测器上同时成像,采用高精度数字图像处理方式提取成像靶标质心位置,依据质心位置调整焦面位置,从而实现通道间的高精度配准。该设备便携、操作简单、成本低,且配准精度可达 0.3 像元尺寸,为遥感相机通道配准、图像融合提供了有力保证。

## 参考文献:

- [1] Xiong Shengqing. The application status and development trend of remote sensing technology in national land and resources [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2002, 51(1): 1-5. (in Chinese)  
熊盛青. 国土资源遥感技术应用现状与发展趋势[J]. *国土资源遥感*, 2002, 51(1): 1-5.
- [2] Yang Bingxin. The development survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19(2): 16-24. (in Chinese)  
杨秉新. 国外航天侦察相机和测绘相机发展概况[J]. *航天返回与遥感*, 1998, 19(2): 16-24.
- [3] Zhang Guoyi. Optical registration for multi-spectral and multi-Lens CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote sensing*, 2001, 22(1): 51-54. (in Chinese)  
张国瑞. 多光谱多镜头 CCD 相机的光学配准[J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(1): 51-54.
- [4] Jiang Yonghua, Zhang Guo, Tang Xinming, et al. Research on the high accuracy band-to-band registration method of ZY-3 multispectral image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(6): 884-897. (in Chinese)

- 蒋永华, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星多光谱影像高精度谱段配准[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 884-897.
- [5] Yue Chunyu, He Hongyan, Xing Kun, et al. Registration error analysis of multispectral optical remote sensing detector [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(2): 100-108. (in Chinese)  
岳春宇, 何红艳, 邢坤, 等. 多谱段光学遥感探测器配准误差分析[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(2): 100-108.
- [6] Chenghai Yang. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural remote sensing [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88(4): 13-24.
- [7] Antoni R. Progress in focal plane array technologies [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(2-3): 342-473.
- [8] Mukund R, Krishnamurthy J, Udai R, et al. Classification of high resolution satellite imagery - The experience from IRS-1C/1D[C]//IAF International Astronautical Congress 49th, Melbourne, Australia, 1998.
- [9] He Xin, Wei Zhonghui, Hao Zhihang. Digital camera modeling of butting 9 CCD chips in the concentric spherical lens system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 421-424. (in Chinese)  
何昕, 魏仲慧, 郝志航. 基于单心球面系统的九块面阵CCD数字拼接[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(4): 421-424.
- [10] Wang Wei, Li Lin. Reflector mirror based optical butting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 80-86. (in Chinese)  
王伟, 李林. 反射式光学像面拼接方法研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 80-86.
- [11] Guo Yue, Yang Hua. Image rectification of multi-spectral CCD camera registration [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2): 229-231. (in Chinese)  
郭悦, 杨桦. 多光谱CCD相机配准的图像校正[J]. *光学技术*, 2003, 29(2): 229-231.
- [12] Liu Qiao, Xing Xiayun, Wang Mi, et al. Precision analysis of satellite multi-spectral image registration based on geometric positioning consistency [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(6): 64-71. (in Chinese)  
刘桥, 向夏芸, 王密, 等. 基于几何定位一致性的星载多光谱影像配准精度分析[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(6): 64-71.
- [13] Guo Yue, Yang Hua. Optical registration of the multi-spectral CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1): 29-32. (in Chinese)  
郭悦, 杨桦. 多光谱CCD相的光学机配准[J]. *航天返回与遥感*, 2003, 24(1): 29-32.
- [14] Zhu Min, Jin Weiqi, Xu Pengmei. Registration of multi-lens multi-spectrum cameras for use in remote sensing satellites [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(5): 633-637. (in Chinese)  
朱敏, 金伟其, 徐彭梅. 遥感卫星多镜头多光谱相机的配准技术[J]. *北京理工大学学报*, 2003, 23(5): 633-637.
- [15] Xu Pengmei, Yang Hua, Fu Ruimin, et al. Optical butting, registration and focus-fixing of CCD camera for CBERS-1 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(3): 12-15. (in Chinese)  
徐彭梅, 杨桦, 伏瑞敏, 等. CBERS-1卫星CCD相机的光学拼接、配准和定焦[J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(3): 12-15.
- [16] Zhang Xiaoxia, Wang Xiaoqiang, Bai Fuzhong, et al. Improved gray centroid method for extracting the center-line of light-stripe [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5): 622-626. (in Chinese)  
张小艳, 王晓强, 白福忠, 等. 基于改进灰度重心法的光带中心提取算法[J]. *激光与红外*, 2016, 46(5): 622-626.
- [17] Wang Lei, Wang Shouyin, Zhou Hu, et al. Basic principles and use method of collimator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 980-982. (in Chinese)  
王磊, 王守印, 周虎, 等. 平行光管的基本原理及使用[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6): 980-982.
- [18] Ji Xiaohui, Sun Houhuan, Zhou Bifang. Optical system design of the collimator with large field of view [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(1): 55-58. (in Chinese)  
吉小辉, 孙后环, 周必方. 大视场平行光管光学系统的研制[J]. *光学仪器*, 2008, 30(1): 55-58.